

KESAN PEMBEBANAN SPEKTRUM DAN SUHU TERHADAP HAYAT LESU
ALOI ALUMINIUM AA6061 DAN AA7075

KAMARUL ARIFFIN ZAKARIA

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH
DOKTOR FALSAFAH

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2014

PENAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang setiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

13 Mac 2014

KAMARUL ARIFFIN ZAKARIA
P 49154

PENGHARGAAN

Alhamdulillah, setinggi-tinggi kesyukuran dipanjatkan ke hadrat Allah S.W.T, Tuhan yang Maha Berkuasa dan Pentadbir mutlak alam semesta ini. Dengan keizinanMu jua Ya Allah, maka penulisan tesis doktor falsafah ini dapat disiapkan.

Pertama sekali, saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Teknikal Malaysia Melaka yang telah sudi menganugerahkan biasiswa SLAB kepada saya dan juga Universiti Kebangsaan Malaysia yang telah menyediakan tempat pengajian bagi membolehkan penyelidikan ini disempurnakan dengan jayanya.

Penghargaan yang tidak terhingga ditujukan kepada penyelia utama, Professor Ir. Dr. Shahrum Abdullah yang telah banyak membantu, memberi bimbingan dan tunjuk ajar dalam menjayakan penyelidikan ini. Penghargaan yang sama juga ditujukan terutamanya kepada penyelia bersama, Professor Madya Dr. Mariyam Jameelah Ghazali. Rasa terima kasih yang tidak terhingga kepada kakitangan sokongan fakulti dan rakan-rakan seperjuangan yang telah banyak membantu.

Penghargaan istimewa ditujukan khas buat isteri yang dikasihi, Lailaton Omar yang telah banyak berkorban dan bersabar dalam membantu tugas suaminya. Kepada tiga orang cahaya mata yang disayangi, Auni Nadirah, Anis Najwa dan Aidil Azfar; semoga apa yang ayah lakukan ini dapat memberi semangat kepada kalian semua untuk berjaya dengan lebih cemerlang di masa hadapan.

Akhir kata, terima kasih yang tidak terhingga kepada semua yang telah membantu, sama ada secara langsung mahupun tidak langsung. Hanya Allah yang dapat membalas jasa baik kalian semua.

ABSTRAK

Kajian ini memfokuskan kesan turutan pembebanan ke atas hayat lesu bahan pada suhu tinggi. Pengkajian hayat lesu di bawah pembebanan pelbagai amplitud merupakan suatu subjek yang penting kerana sebahagian besar komponen kejuruteraan dikenakan tegasan yang berubah-ubah dengan masa. Diketahui bahawa kesan turutan pembebanan jelas mempengaruhi hayat lesu bahan. Walau bagaimanapun, sejauh mana kesan turutan pembebanan ini pada suhu tinggi masih menjadi persoalan dan perlu kepada suatu pengkajian yang khusus. Justeru itu, objektif utama kajian ini adalah untuk menjalankan satu kaedah penilaian hayat lesu pada suhu tinggi di bawah pembebanan spektrum yang telah dijana daripada pembebanan rawak komponen kejuruteraan sebenar. Isyarat terikan lesu telah dicerap daripada pendakap penetap enjin kereta 1300 cc yang dipandu di atas dua jenis permukaan jalan iaitu di lebuh raya dan jalan raya kawasan taman perumahan. Sebelum cerapan data lesu dilakukan, analisis unsur terhingga secara statik telah dijalankan bagi menentukan kawasan paling kritikal pada pendakap penetap enjin kereta. Keputusan menunjukkan isyarat terikan lesu bagi jalan raya kawasan taman perumahan mempunyai parameter-parameter statistik dan nilai kerosakan lesu yang lebih tinggi ke atas pendakap penetap enjin kereta berbanding dengan isyarat terikan lesu bagi lebuh raya. Pembebanan amplitud malar, pembebanan dengan turutan tinggi kepada rendah dan pembebanan dengan turutan rendah kepada tinggi telah dijana dengan menggunakan kaedah nilai kerosakan setara. Bahan aloi aluminium 6061-T6 dan 7075-T6 telah digunakan sebagai subjek dalam kajian kerana bahan ini banyak digunakan dalam pembuatan komponen automotif dan kejuruteraan. Antara penggunaan aloi aluminium sebagai komponen automotif termasuklah dalam pembuatan omboh, kepala silinder, rim roda, pendakap, komponen brek, komponen stereng, panel dan struktur badan. Ujikaji hayat lesu dan ujikaji perambatan retak lesu dijalankan pada suhu bilik berdasarkan kepada piawaian ASTM E466 dan ASTM E647. Keputusan menunjukkan jumlah hayat lesu paling rendah di bawah pembebanan amplitud malar dan jumlah hayat lesu paling tinggi di bawah pembebanan dengan turutan rendah kepada tinggi. Ujikaji hayat lesu pada suhu tinggi telah dilakukan pada suhu 70 °C, 150 °C dan 250 °C. Julat suhu ini dipilih berdasarkan kepada suhu maksimum bagi pendakap penetap enjin kereta dan juga suhu puncak kepala silinder yang boleh dicapai ketika beroperasi. Keputusan yang diperolehi menunjukkan hayat lesu berkurangan secara eksponen dengan peningkatan suhu. Kesan turutan pembebanan pula didapati lebih dominan pada suhu bilik berbanding pada suhu tinggi dengan perbezaan hayat lesu sebanyak 36 % hingga 45 % pada suhu bilik berbanding dengan 7 % hingga 14 % sahaja pada suhu 250 °C. Kesan turutan pembebanan turut dilihat daripada pemerhatian ke atas permukaan patah. Pengukuran kadar perambatan retak lesu pada suhu bilik secara mikroskopik mendapati taburan titik korelasi berada dalam julat faktor 2. Kesimpulannya, kesan turutan pembebanan penting untuk diambil kira dalam penilaian hayat lesu bahan terutamanya pada suhu bilik berbanding dengan suhu tinggi. Perkaitan matematik antara hayat lesu suhu bilik dengan suhu tinggi turut menyumbang kepada peramalan hayat lesu secara formulasi.

SPECTRUM LOADING AND TEMPERATURE EFFECTS ON FATIGUE LIFE OF ALUMINIUM ALLOY AA6061 AND AA7075

ABSTRACT

This study focuses on the load sequence effect of fatigue life at elevated temperatures. The study of fatigue life under variable amplitude loadings is an important subject as most engineering components are subject to stresses which vary with time. As the load sequence strongly influences the fatigue life of materials, the severity level at elevated temperatures is still in infancy. The main objective of this study is to perform a method for fatigue life assessment at elevated temperatures under spectrum loadings which generated from random loading of the actual engineering component. The fatigue strain signal was recorded from an engine mount bracket of a 1300 cc automobile, which was driven on different surfaces (highways and residential areas). Prior to recording, a static finite element analysis was performed to determine the most critical area of the engine mount bracket. The results showed that the fatigue strain signal of the residential roads had higher statistical parameter and fatigue damage values than highway roads. Constant amplitude, high-to-low sequence, and low-to-high sequence loadings were generated from the original fatigue strain signals by applying a method of equivalent damage value. Aluminium alloys 6061-T6 and 7075-T6 were used as subjects of this study due to their wide application in automotive and engineering components. Among of automotive parts made from aluminium alloys included the used in manufacturing of piston, cylinder head, alloy rim, bracket, brake components, steering components, panels and body structures. The fatigue life and fatigue crack propagation tests were performed at room temperature in accordance to the ASTM E466 and ASTM E647 standards. It was found that that the number of cycle to failure was the lowest under constant amplitude loading and the highest under low-to-high sequence loading. The fatigue tests at elevated temperatures were performed at 70 °C, 150 °C, and 250 °C. The elevated temperature range was chosen based on the maximum temperature of the engine mount bracket and the peak temperature of the cylinder head that can be reached in service. Results indicated that the number of cycles to failure was reduced exponentially as the temperature increased. The load sequence effect was also found to be more dominant at room temperature compared to those at elevated temperature. The difference in the number of cycles to failure was about 36 % to 45 % at room temperature compared with only 7 % to 14 % at 250 °C. The load sequence effect was also observed in the fractographic analysis. The measurement of the fatigue crack propagation rates at room temperature based on microscopic observation was found to be within the range of factor 2. In conclusion, the load sequence effect was crucial to the fatigue life assessment, especially at room temperature compared to those at the elevated temperature. A mathematical relationship between the fatigue life at room temperature and at elevated temperature also contributed to the prediction of fatigue life.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	x
SENARAI RAJAH	xii
SENARAI SIMBOL	xx
SENARAI SINGKATAN	xxi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Kegagalan Lesu pada Suhu Tinggi	5
1.3 Penyataan Masalah	7
1.4 Objektif Penyelidikan	9
1.5 Skop Kajian	10
1.6 Hipotesis Kajian	11
1.7 Kepentingan Kajian	12
 BAB II KAJIAN KEPUSTAKAAN	
2.1 Pengenalan	13
2.2 Mekanisma Kegagalan Lesu	13
2.3 Pembebanan Lesu	16
2.3.1 Pembebanan Amplitud-Malar	17
2.3.2 Pembebanan Pelbagai Amplitud	18
2.4 Analisis Isyarat Lesu	21
2.5 Penilaian Hayat Lesu	24
2.5.1 Pendekatan Hayat-Tegasan	24
2.5.2 Pendekatan Hayat-Terikan	26
2.5.3 Konsep Perambatan Retak Lesu	30
2.6 Kesan Suhu ke atas Hayat Lesu Bahan	34

2.6.1	Kekuatan Bahan pada Suhu Tinggi	35
2.6.2	Mekanisma Ubah Bentuk Kitaran Lesu	35
2.6.3	Lengkung <i>S-N</i> pada Suhu Tinggi	37
2.6.4	Kesan Mikrostruktur dan Bentuk Geometri	39
2.7	Kesan Turutan Pembebanan ke atas Kelakuan Hayat Lesu	41
2.7.1	Kesan Beban-Lebih Tunggal dalam Kitaran Pembebanan	42
2.7.2	Kesan Peratusan Beban-Lebih dan Nisbah Beban	45
2.7.3	Kesan Beban-Lebih Berganda dalam Kitaran Pembebanan	47
2.7.4	Kesan Beban-Kurang dalam Kitaran Pembebanan	49
2.7.5	Kesan Turutan Pembebanan Spektrum	52
2.8	Analisis ke Atas Permukaan Patah Lesu	58
2.8.1	Pendekatan Analisis Permukaan Patah	58
2.8.2	Patah Mulur	59
2.8.3	Patah Rapuh	61
2.8.4	Patah Antara Berbutir	62
2.8.5	Kesan Goresan pada Permukaan Patah Lesu	63
2.9	Rumusan	65

BAB III METODOLOGI KAJIAN

3.1	Pengenalan	67
3.2	Analisis Unsur Terhingga Pembebanan Statik	69
3.3	Pengumpulan Isyarat Terikan Lesu	73
3.4	Analisis Data Isyarat Terikan Lesu	77
3.5	Pembangunan Pembebanan Spektrum	78
3.6	Penyediaan Spesimen Ujikaji	84
3.6.1	Bahan yang Digunakan	84
3.6.2	Penyediaan Spesimen Ujian Tegangan	85
3.6.3	Penyediaan Spesimen Ujian Hayat Lesu	86
3.6.4	Penyediaan Spesimen Ujian Perambatan Retak Lesu	88
3.7	Penentuan Sifat-Sifat Monotonik Bahan	89
3.8	Penentuan Hayat Lesu di bawah Pembebanan Spektrum	91
3.9	Penentuan Sifat-Sifat Perambatan Retak Lesu	94
3.10	Analisis ke atas Permukaan Patah Spesimen	99
3.10.1	Pemerhatian Permukaan Patah	99
3.10.2	Perkaitan antara Kadar Perambatan Retak Lesu Mikroskop dan Visual	101
3.10.3	Ujian Kekerasan-Mikro	102

3.11	Perkaitan Matematik antara Hayat Lesu Suhu Bilik dan Suhu Tinggi	105
3.12	Rumusan	106

BAB IV KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1	Pengenalan	108
4.2	Pemprosesan Isyarat Terikan Lesu	109
4.2.1	Sifat-Sifat Isyarat Terikan Lesu yang Dicerap	109
4.2.2	Kaitan antara Isyarat Terikan Lesu dengan Kerosakan Lesu pada Pendakap Penetap Enjin Kereta	112
4.3	Penentuan Sifat Monotonik Bahan Spesimen	115
4.3.1	Kekuatan Aloj Aluminium Siri AA6061 dan AA7075 pada Suhu Bilik	116
4.3.2	Kesan Peningkatan Suhu ke atas Aloj Aluminum AA6061 dan AA7075	119
4.4	Penentuan Hayat Lesu Spesimen pada Suhu Bilik	121
4.4.1	Lengkung <i>S-N</i> di bawah Pembebanan Amplitud Malar	122
4.4.2	Perbandingan Hayat Lesu di bawah Pembebanan Spektrum	124
4.4.3	Pemerhatian Permukaan Patah pada Suhu Bilik	127
4.5	Analisis Kadar Perambatan Retak Lesu	131
4.5.1	Perbandingan Kadar Perambatan Retak Lesu di bawah Pembebanan Spektrum	132
4.5.2	Pemerhatian Permukaan Patah Spesimen Ujian Perambatan Retak Lesu	136
4.5.3	Penentuan Kadar Perambatan Retak Lesu Secara Mikroskop	142
4.6	Penentuan Hayat Lesu pada Suhu Tinggi	149
4.6.1	Kesan Suhu ke atas Hayat Lesu	150
4.6.2	Kesan Pembebanan Spektrum pada Suhu Tinggi	153
4.6.3	Permukaan Patah Lesu pada Suhu Tinggi	156
4.6.4	Kekerasan-Mikro Permukaan Patah Lesu	160
4.7	Perkaitan Matematik bagi Hayat Lesu pada Suhu Bilik dan Suhu Tinggi	163
4.8	Peramalan Hayat Lesu Berdasarkan Taburan Kebarangkalian	171

BAB V KESIMPULAN DAN CADANGAN

5.1	Kesimpulan	176
5.1.1	Kelakuan Hayat Lesu di bawah Pembebanan Spektrum	176
5.1.2	Pengaruh Peningkatan Suhu Terhadap Kesan Turutan Pembebanan	177
5.1.3	Perkaitan Matematik antara Hayat Lesu Suhu Bilik dengan Suhu Tinggi	178
5.1.4	Sumbangan Keilmuan	179
5.2	Cadangan untuk Kajian Lanjutan	179

RUJUKAN	181
----------------	-----

LAMPIRAN

A	Senarai Penerbitan	198
---	--------------------	-----

SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
3.1	Spesifikasi tolok terikan dan pelekat yang digunakan	74
3.2	Contoh jumlah kerosakan lesu yang disumbangkan oleh isyarat terikan lesu asal dan isyarat pembebanan spektrum yang direka bentuk	81
3.3	Kandungan kimia bagi aloi aluminium (% berat)	85
3.4	Jenis pembebanan yang digunakan dalam analisis kadar perambatan retak lesu	95
3.5	Jumlah kerosakan lesu yang disumbangkan oleh setiap kes pembebanan	97
4.1	Perbandingan nilai-nilai statistik sejagat bagi isyarat terikan yang dicerap	112
4.2	Sifat-sifat mekanikal bagi aloi aluminum siri AA6061 dan AA7075	117
4.3	Sifat-sifat mekanikal bagi aloi aluminium siri AA6061 dan AA7075	120
4.4	Pemalar kekuatan lesu dan eksponen Basquin bagi AA6061 dan AA7075 pada suhu bilik dan ditingkatkan	124
4.5	Ringkasan kadar perambatan retak lesu secara mikroskop untuk setiap kes pembebanan	145
4.6	Ringkasan kadar perambatan retak lesu untuk setiap kes pembebanan	147
4.7	Julat perbezaan maksimum kitaran hayat lesu di bawah turutan pembebanan berbeza untuk setiap suhu ujikaji bagi spesimen AA6061	154
4.8	Julat perbezaan maksimum kitaran hayat lesu di bawah turutan pembebanan berbeza untuk setiap suhu ujikaji bagi spesimen AA7075	154
4.9	Purata kekerasan-mikro permukaan patah lesu di bawah turutan pembebanan berbeza untuk setiap suhu ujikaji bagi spesimen AA6061	161
4.10	Purata kekerasan-mikro permukaan patah lesu di bawah turutan pembebanan berbeza untuk setiap suhu ujikaji bagi spesimen AA7075	161

SENARAI RAJAH

No. Rajah		Halaman
1.1	Pengkelasan lesu suhu tinggi	6
2.1	Gambaran skematik proses permulaan retak lesu serta perambatan retak lesu peringkat I dan II di bawah pembebanan tegangan berkitar	15
2.2	Permukaan patah lesu yang berlaku pada aci keluli karbon sedarhana bermula daripada permulaan retak lesu, perambatan retak dan patah keseluruhannya	16
2.3	Pengkelasan pembebanan lesu	17
2.4	Kitaran pembebanan amplitud-malar	18
2.5	Pembebanan spektrum dengan kitaran beban-lebih dan beban-kurang yang dikenakan secara berulang	19
2.6	Dua jenis pembebanan spektrum dengan turutan tinggi kepada rendah	20
2.7	Nilai amplitud tegasan maksimum dan minimum berubah secara rawak dengan masa dalam pembebanan rawak	20
2.8	Lengkung <i>S-N</i> bagi beberapa jenis logam yang diplotkan pada skala semi-log	26
2.9	Lengkung hayat-terikan menunjukkan komponen jumlah terikan, terikan elastik dan terikan plastik	28
2.10	Contoh lengkung kadar perambatan retak lesu	31
2.11	Kesan aras pembebanan yang dikenakan terhadap kadar perambatan retak lesu pada nisbah tegasan, $R = 0.1$	32
2.12	Contoh lengkung kadar perambatan retak lesu bagi aloi aluminium AA7055 yang dilakukan proses penuaan yang berbeza	33
2.13	Perbandingan panjang retak berbanding dengan jumlah kitaran lesu bagi superaloi U720PM pada suhu 450 °C dan 550 °C	34
2.14	Kesan peningkatan suhu ke atas kekuatan tegangan muktamad keluli tahan karat 18Cr-2Mo	35
2.15	Contoh lengkung kitaran lesu bagi aloi aluminium 7055-T7751 pada suhu: (a) 27 °C, dan (b) 190 °C	36
2.16	Lengkung ubah bentuk kitaran bagi spesimen AA6110 penuaan-kurang pada suhu ujikaji berbeza	37
2.17	Kesan peningkatan suhu ke atas hayat lesu keluli tahan karat 316L pada kadar terikan yang berbeza	38
2.18	Lengkung <i>S-N</i> bagi aloi aluminium AA6110 di bawah penuaan-kurang pada suhu yang berbeza	39

2.19	(a) Kesan saiz keporosan mikrostruktur, (b) kesan peningkatan suhu ke atas hayat lesu aluminium tuangan E319	40
2.20	Lengkung <i>S-N</i> bagi spesimen licin dan bertakuk superaloi SRR99 bagi ujian lesu kitaran tinggi pada suhu: (a) 700 °C, (b) 900 °C	41
2.21	(a) Turutan pembebanan amplitud-malar dan beban-lebih tunggal yang digunakan dalam ujikaji, (b) kesan beban-lebih tunggal terhadap kadar perambatan retak lesu	43
2.22	Kesan beban-lebih tunggal terhadap saiz zon plastik hujung retak lesu	44
2.23	Keputusan ujikaji bagi jumlah kitaran lengah selepas dikenakan beban-lebih sebagai fungsi nisbah tegasan, <i>R</i>	46
2.24	Kadar perambatan retak lesu berbanding dengan julat faktor keamanan tegasan untuk nisbah beban-lebih yang berbeza	47
2.25	Kesan jarak sela antara beban-lebih dalam kitaran lesu	48
2.26	Keputusan ujikaji ujian lesu bagi spesimen Al 2139-T8 yang dikenakan pembebanan amplitud malar, beban-lebih tunggal dan berganda	49
2.27	Gambaran tipikal beban-kurang yang dikenakan dalam kitaran pembebanan	50
2.28	Kadar perambatan retak lesu bagi aloi aluminium AA7175 yang dikenakan beban-kurang, pada nisbah tegasan $R=0$	50
2.29	Turutan pembebanan tanpa-dimensi yang digunakan dalam ujikaji dengan nilai tegasan maksimum, $\sigma = 200$ MPa ($\sigma = 1.0$)	51
2.30	Beban-kurang dalam kitaran menghasilkan geliciran luar satah, yang mana terkelupas ke atas	52
2.31	Pembebanan spektrum dua peringkat yang digunakan: (a) turutan tinggi kepada rendah, dan (b) turutan rendah kepada tinggi	53
2.32	Perbandingan perubahan tegasan maksimum bagi turutan pembebanan yang berbeza	54
2.33	Perubahan kelakuan kadar perambatan retak lesu apabila dikenakan beban-lebih tegangan tunggal, pembebanan dengan turutan tinggi kepada rendah dan rendah kepada tinggi	55
2.34	Pengaruh tegasan purata yang dikenakan ke atas tegasan pembukaan bagi pembebanan: (a) tegasan maksimum malar, (b) tegasan minimum malar	56
2.35	Contoh kesan nisbah tegasan ke atas jumlah hayat lesu keluli berkekuatan tinggi, SUP12	57
2.36	Pemerhatian makroskop ke atas perambatan retak lesu keluli tahan karat 18Cr-2Mo	58

2.37	Kesan arah pembebanan ke atas bentuk kelompang yang terhasil daripada pertautan lompong-mikro di bawah pembebanan yang berbeza: (a) tegangan, (b) ricihan, (c) koyakan	60
2.38	Contoh tipikal kelompang pecah pada permukaan patah mulur keluli AISI1008	60
2.39	Model patah pecah menunjukkan arah patah, satah pecah dan sempadan bijian	61
2.40	Beberapa muka kecil rata berhubungan dengan tanda sungai yang kelihatan pada spesimen kimpalan aloi magnesium AZ31	62
2.41	(a) Rajah skematik patah antara berbutir, (b) patah antara berbutir bagi bahan kumprum yang ditambah 20 ppm aloi bismut	62
2.42	Gambaran proses pembentukan goresan pada permukaan patah lesu	63
2.43	Imej permukaan patah menggunakan SEM menunjukkan pergoresan lesu yang dikaitkan dengan perambatan retak peringkat II dalam ujian lesu di bawah dua jenis beban: (a) pembebanan amplitud-malar, (b) pembebanan rawak	64
2.44	Contoh tipikal pergoresan di atas permukaan patah lesu dalam ujikaji yang dikenakan: (a) pembebanan amplitud-malar (b) beban-kurang berkala	65
3.1	Rajah skematik aliran proses keseluruhan kajian yang dijalankan	68
3.2	Imej pendakap penetak enjin kereta Perodua MyVi 1300 cc	70
3.3	Carta alir penggunaan kaedah analisis unsur terhingga secara statik	70
3.4	Penjaringan model unsur terhingga bagi pendakap penetak enjin kereta	71
3.5	Plot taburan tegasan yang menunjukkan kawasan yang mengalami tegasan maksimum pada pendakap penetak enjin kereta	73
3.6	Tolok terikan jenis Kyowa, KFG-2-120-C1-11L1M2R dengan panjang tolok bersaiz 2 mm	74
3.7	Proses pengumpulan data isyarat terikan lesu: (a) cerapan isyarat terikan lesu-masa menggunakan tolok terikan, (b) sistem pemerolehan data lesu	75
3.8	Keadaan permukaan jalan untuk cerapan isyarat terikan lesu: (a) lebuh raya, (b) jalan raya kawasan taman perumahan	76
3.9	Isyarat terikan lesu yang dicerap semasa melalui dua permukaan jalan yang berbeza: (a) lebuh raya, (b) jalan raya kawasan taman perumahan	77
3.10	Carta alir yang digunakan untuk menghasilkan beban setara dalam mereka bentuk turutan pembebanan	80
3.11	Paparan antaramuka pengiraan beban setara menggunakan perisian Glyphwork®	81

3.12	Carta alir pengaturcaraan MATLAB bagi penukaran isyarat terikan lesu kepada tegasan	83
3.13	Pembebanan spektrum yang mempunyai turutan pembebanan yang berbeza dan digunakan dalam ujian hayat lesu	84
3.14	(a) Dimensi geometri (unit dalam mm), (b) bahagian yang telah dipotong untuk spesimen ujian tegangan	85
3.15	(a) Dimensi geometri (unit dalam mm), (b) bahagian yang telah dipotong untuk spesimen ujian jumlah hayat lesu	86
3.16	Proses penggilapan spesimen menggunakan mesin larik mini	87
3.17	Pengukuran kemas permukaan menggunakan sistem alat penguji kontur permukaan jenis Mitutoyo S3000	87
3.18	Contoh keputusan profil kemas permukaan spesimen	88
3.19	(a) Geometri bagi spesimen ujian perambatan retak lesu (dalam mm), (b) cadangan dimensi berdasarkan piawaian ASTM E647-00	88
3.20	Mesin Pengujian Umum, jenis Instron 8801	90
3.21	Konfigurasi spesimen untuk ujian tegangan pada: (a) suhu bilik, (b) suhu tinggi	90
3.22	Contoh antaramuka proses penetapan pembebanan lesu dengan turutan pembebanan tinggi kepada rendah menggunakan perisian <i>Instron Wavematrix ver. 1.3</i>	93
3.23	Lakaran skematik dimensi geometri takikan sisi dan pra-retak spesimen	95
3.24	Jenis turutan pembebanan yang berbeza dalam ujian kadar perambatan retak lesu	96
3.25	(a) Mikroskop boleh gerak, jenis euromex Holland digunakan untuk mengukur panjang retak lesu, (b) kedudukan spesimen di bawah mikroskop	98
3.26	Pemerhatian ke atas permukaan patah dibuat pada permukaan yang bertanda (i) dan ujian kekerasan-mikro dilakukan di bawah permukaan patah yang bertanda (ii)	99
3.27	Pemotongan permukaan patah lesu kepada dua bahagian yang lebih kecil menggunakan gergaji berketepatan tinggi	100
3.28	Pemerhatian awal keadaan permukaan patah dengan menggunakan mikroskop Olympus, SZ61	100
3.29	Pemerhatian ke atas permukaan patah menggunakan mikroskop imbasan elektron: (a) kedudukan spesimen dalam mikroskop, (b) imej fraktografi pada skrin komputer	101

3.30	(a) Penggilapan spesimen ujian kekerasan-mikro menggunakan mesin pencanai manual, jenis Mecapol P255, (b) pembesaran imej kedudukan spesimen pada mesin pencanai	103
3.31	Mesin pengujian kekerasan-mikro, jenis Mitutoyo Microwizhard	104
3.32	Profil pelekok Vickers yang digunakan dengan sudut muka 136°	104
3.33	Profil keratan rentas spesimen yang dilakukan ujian kekerasan-mikro	105
4.1	Taburan isyarat terikan lesu yang dicerap semasa melalui dua permukaan jalan yang berbeza: (a) jalan raya kawasan taman perumahan, (b) lebuh raya	110
4.2	Perbandingan nilai kerosakan lesu yang dianalisa menggunakan model hayat-terikan yang berbeza	114
4.3	(a) Histogram kitaran lesu, (b) Histogram kerosakan lesu, bagi isyarat yang dicerap di jalan raya kawasan taman perumahan	115
4.4	(a) Histogram kitaran lesu, (b) Histogram kerosakan lesu, bagi isyarat yang dicerap di lebuh raya	115
4.5	Graf tegasan melawan terikan bagi aloi aluminium AA6061-T6 dan AA7075-T6 pada suhu bilik	117
4.6	Keadaan patah spesimen selepas ujian tegangan bagi bahan aloi aluminium: (a) AA7075, (b) AA6061	118
4.7	Keadaan permukaan patah spesimen daripada ujian tegangan yang dilakukan ke atas aloi aluminium: (a) AA6061, (b) AA7075	119
4.8	Graf tegasan melawan terikan bagi aloi aluminium AA6061 pada suhu bilik dan suhu tinggi	120
4.9	Graf tegasan melawan terikan bagi aloi aluminium AA7075 pada suhu bilik dan suhu tinggi	121
4.10	Kesan peningkatan suhu ke atas sifat-sifat mekanikal bahan: (a) tegasan muktamad (b) modulus elastik	121
4.11	Proses penukleusan lompong-mikro sehingga gagal	122
4.12	Lengkung <i>S-N</i> bagi aluminium aloi, AA6061-T6 pada suhu bilik	123
4.13	Lengkung <i>S-N</i> bagi aluminium aloi AA7075-T6 pada suhu bilik	123
4.14	Perbandingan jumlah hayat lesu di bawah pembebanan spektrum pada suhu bilik bagi AA6061	126
4.15	Perbandingan jumlah hayat lesu di bawah pembebanan spektrum pada suhu bilik bagi AA7075	126
4.16	Permukaan patah lesu pada suhu 27°C di bawah pembebanan spektrum berbeza: (a) amplitud-malar, (b) turutan tinggi kepada rendah, (c) turutan rendah kepada tinggi	128

4.17	Contoh pemerhatian ke atas permukaan patah lesu pada suhu 27 °C menunjukkan pencirian berikut: (a) bahagian permulaan retak, (b) pembesaran yang lebih tinggi pada kawasan tersebut	128
4.18	Proses lesu di mana permulaan retak berlaku pada jalur gelincir di permukaan dan permulaan perambatan retak lesu berlaku pada orientasi 45 °	129
4.19	Pemerhatian mikroskop pada peringkat perambatan retak lesu di bawah pembebanan spektrum berbeza: (a) amplitud-malar, (b) turutan tinggi kepada rendah, (c) turutan rendah kepada tinggi	130
4.20	Pemerhatian mikroskop pada peringkat perambatan retak dengan pembesaran yang lebih tinggi iaitu 5000x bagi setiap kes pembebanan berikut: (a) amplitud-malar, (b) turutan tinggi kepada rendah, (c) turutan rendah kepada tinggi	131
4.21	Perbandingan plot panjang retak yang dinormalkan menggunakan turutan pembebanan yang berbeza (jalan raya kawasan taman perumahan)	133
4.22	Perbandingan plot panjang retak yang dinormalkan menggunakan turutan pembebanan yang berbeza (lebuhraya)	133
4.23	Gambaran corak 'beban-lebih' yang wujud ketika peralihan kitaran blok pembebanan pertama kepada blok pembebanan kedua	135
4.24	Lakaran skematik saiz zon plastik pada hujung retak lesu yang dikenakan pembebanan beban-lebih	135
4.25	Pemerhatian makroskop ke atas permukaan patah lesu untuk setiap kes pembebanan	137
4.26	Tiga zon perambatan retak lesu pada spesimen aloi aluminium yang dikaji	137
4.27	Pemerhatian mikroskop perambatan retak lesu peringkat I dengan tanda sungai pada permukaan patah	138
4.28	Pemerhatian mikroskop perambatan retak lesu peringkat II menunjukkan kesan goresan pada permukaan patah spesimen di bawah pembebanan lesu: (a) amplitud-malar, (b) turutan tinggi kepada rendah, (c) turutan rendah kepada tinggi	140
4.29	Permukaan patah pada kawasan patah pantas di bawah pembebanan lesu berkaitan: (a) amplitud-malar, (b) turutan tinggi kepada rendah, (c) turutan rendah kepada tinggi	141
4.30	Penentuan purata jarak sela goresan untuk setiap turutan pembebanan berbeza: (a) kes 1, (b) kes 2, (c) kes 3, (d) kes 4, (e) kes 5, (f) kes 6	144

4.31	Perbandingan kadar perambatan retak lesu menggunakan turutan pembebanan yang berbeza (permukaan jalan raya kawasan taman perumahan)	146
4.32	Perbandingan kadar perambatan retak lesu menggunakan turutan pembebanan yang berbeza (permukaan lebuhraya)	146
4.33	Perbandingan antara kadar perambatan retak lesu secara pemerhatian visual dan mikroskop	148
4.34	Hubungan korelasi antara kadar perambatan retak lesu visual dan mikroskop untuk enam kes pembebanan	149
4.35	Hubungkait lurus korelasi antara kadar perambatan retak lesu visual dan mikroskop berdasarkan kepada regresi lurus	149
4.36	Kesan peningkatan suhu ke atas hayat lesu di bawah pembebanan spektrum bagi aloi aluminium AA6061	151
4.37	Kesan peningkatan suhu ke atas hayat lesu di bawah pembebanan spektrum bagi aloi aluminium AA7075	151
4.38	Perbandingan jumlah julat hayat lesu di bawah pembebanan spektrum bagi AA6061 yang dikaji pada suhu yang berbeza	154
4.39	Perbandingan jumlah julat hayat lesu di bawah pembebanan spektrum bagi AA7075 yang dikaji pada suhu yang berbeza	155
4.40	Permukaan patah lesu pada suhu 250 °C di bawah pembebanan spektrum berbeza: (a) amplitud-malar (b) turutan tinggi kepada rendah, (c) turutan rendah kepada tinggi	158
4.41	Contoh pemerhatian ke atas permukaan patah lesu pada suhu 250 °C menunjukkan: (a) bahagian permulaan retak, (b) pembesaran yang lebih tinggi pada kawasan tersebut	158
4.42	Mikrograf bagi peringkat perambatan retak lesu pada suhu tinggi: (a) 70 °C, (b) 150 °C, (c) 250 °C	159
4.43	Purata kekerasan-mikro permukaan patah spesimen aloi aluminium siri AA6061 di bawah suhu ujikaji berbeza	161
4.44	Purata kekerasan-mikro permukaan patah spesimen aloi aluminium siri AA7075 di bawah suhu ujikaji berbeza	161
4.45	Perkaitan antara parameter kepekaan suhu dan suhu mutlak bagi aloi aluminium AA6061	165
4.46	Perkaitan antara parameter kepekaan suhu dan suhu mutlak bagi aloi aluminium AA7075	165
4.47	Ramalan lengkung <i>S-N</i> pada suhu yang ditingkatkan bagi aloi aluminium, AA6061	167
4.48	Ramalan lengkung <i>S-N</i> pada suhu yang ditingkatkan bagi aloi aluminium, AA7075	167

4.49	Corak lengkung <i>S-N</i> yang setara diperolehi dalam ujian hayat lesu bagi aloi aluminium AA6110 pada suhu ditingkatkan	167
4.50	Perbandingan antara keputusan ujian lesu ujikaji dan ramalan yang dilakukan pada suhu 250 °C bagi aloi aluminium, AA6061	169
4.51	Perbandingan antara keputusan ujian lesu ujikaji dan ramalan yang dilakukan pada suhu 250 °C bagi aloi aluminium, AA7075	169
4.52	Perbandingan antara lengkung <i>S-N</i> ramalan dan ujikaji yang dilakukan pada suhu 250 °C bagi aloi aluminium, AA6061	169
4.53	Perbandingan antara lengkung <i>S-N</i> ramalan dan ujikaji yang dilakukan pada suhu 250 °C bagi aloi aluminium, AA7075	170
4.54	Plot Taburan Weibull bagi hayat lesu aloi aluminium siri AA6061 dan AA7075 pada suhu bilik	173
4.55	Taburan kebarangkalian untuk gagal bagi dua jenis aloi aluminium yang dikenakan pembebanan pada suhu bilik: (a) AA6061, (b) AA7075	174
4.56	Taburan kebarangkalian untuk gagal bagi dua jenis aloi aluminium yang dikenakan pembebanan pada suhu 250 °C: (a) AA6061, (b) AA7075	175

SENARAI SIMBOL

ε	Terikan
ε_a	Amplitud terikan
ε'_f	Pekali kemuluran lesu
σ	Varian
σ	Tegasan
σ_a	Amplitud tegasan
σ'_f	Pekali kekuatan lesu
σ_r	Julat tegasan
σ_m	Purata tegasan
σ_{mak}	Tegasan maksimum
σ_{min}	Tegasan minimum
μ	Mikro
Δa	Jarak goresan
A	Amplitud
b	Eksponen Basquin
B	Tebal spesimen
c	Eksponen kemuluran lesu
c	Eksponen kepekaan suhu
d_1, d_2	Jarak pepenjuru
D_1, D_2	Jumlah kerosakan lesu
da/dN	Kadar perambatan retak lesu
E	Modulus elastik
f	Frekuensi
F	Daya yang dikenakan
H	Ketinggian saiz pra-retak
H_v	Kekerasan Vickers
K	Kurtosis
K	Pemalar kekuatan terikan
K	Faktor keamatan tegasan

K_c	Keliatan patah
K_{mak}	Julat faktor keamatan tegasan maksimum
ΔK	Julat faktor keamatan tegasan
ΔK_{th}	Julat ambang faktor keamatan tegasan
M	Min bagi isyarat
n	Eksponen kekuatan terikan
n	Bilangan data
N	Jumlah kitaran
N_d	Jumlah kitaran lengah
N_f	Jumlah hayat lesu
R	Nisbah tegasan
R_a	Kemasan permukaan bahan
R^2	Regresi kelengkungan
$r.m.s$	Punca kuasa dua
S	Kepencongan
SD	Sisihan piawai
t	Masa
T	Suhu
U	Nisbah pembukaan retak
W	Lebar spesimen
\bar{x}	Purata data
x_i	Nilai-nilai bagi data diskrit

SENARAI SINGKATAN

<i>ASTM</i>	Persatuan Amerika untuk Ujian dan Bahan
<i>CAL</i>	Pembebanan amplitud malar
<i>CDF</i>	Taburan kegagalan komulatif
<i>CTOD</i>	Penderia bukaan hujung retak
<i>E-N</i>	Hayat-terikan
<i>HL</i>	Turutan tinggi kepada rendah
<i>LH</i>	Turutan rendah kepada tinggi
<i>MOL</i>	Beban-lebih berganda
<i>PSD</i>	Ketumpatan spektrum kuasa
<i>RMSE</i>	Ralat punca kuasa dua
<i>SEM</i>	Mikroskop imbasan elektron
<i>SDAS</i>	Spesimen dengan jarak dendrit kedua
<i>S-N</i>	Hayat-tegasan
<i>SOL</i>	Beban-lebih tunggal
<i>SWT</i>	Smith-Watson-Topper

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 PENGENALAN

Struktur dan komponen kejuruteraan direka bentuk dengan teliti supaya ia dapat menanggung sejumlah beban yang dikenakan ke atasnya. Kegagalan sesuatu struktur dan komponen kejuruteraan untuk menanggung beban ke atasnya boleh menyebabkan banyak kerugian sama ada daripada segi kos pembuatan, penyelenggaraan, masa penggunaan dan juga keselamatan kepada pengguna. Kegagalan yang berlaku biasanya melibatkan suatu interaksi pembebanan yang kompleks, keadaan persekitaran serta dalam julat masa yang tertentu. Terdapat pelbagai bentuk kegagalan struktur dan komponen kejuruteraan termasuk disebabkan oleh perubahan reka bentuk yang berlebihan, kepatahan, ledakan, rayapan, kejutan termal, ledingan, pengaratan, kegagalan lesu dan sebagainya.

Kegagalan lesu merupakan salah satu daripada mekanisma kegagalan utama yang berlaku pada struktur dan komponen kejuruteraan. Kegagalan lesu menyumbang kira-kira 90 % daripada jumlah kegagalan mekanikal (Callister 2007; Von 2009). Kegagalan lesu adalah kegagalan yang berlaku di bawah kitaran pembebanan. Struktur dan komponen kejuruteraan mengalami kegagalan lesu apabila jumlah kitaran pembebanan yang dikenakan telah mencapai suatu jumlah kitaran yang tertentu (Lee et al. 2005; Draper 2007). Umumnya, amplitud tegasan ulang-alik yang dikenakan ini lebih rendah daripada kekuatan muktamad sesuatu bahan. Pembebanan berkitar ini menyebabkan penyusutan yang progresif ke atas sifat-sifat bahan dan akhirnya menyebabkan kegagalan lesu berlaku (Shighley & Mischke 2003; Post et al. 2008). Fenomena kegagalan lesu boleh membawa kepada suatu

bencana dan merbahaya kepada keselamatan umum, terutamanya kerana ia berlaku secara tiba-tiba dan tidak menunjukkan isyarat sebelum berlakunya kegagalan lesu (Callister 2007; Dhar & Patil 2012). Oleh itu, penilaian ke atas hayat lesu bahan dan peramalan jumlah kitaran pembebanan hingga gagal adalah sangat penting kepada hampir kesemua aplikasi kejuruteraan (Amiri & Khonsari 2010).

Kajian ke atas kegagalan lesu telah dilakukan sejak tahun 1800-an lagi. Dalam tahun 1837, William Albert merupakan orang yang pertama menerbitkan artikel berkenaan dengan lesu. Beliau telah mereka satu mesin untuk menguji kegagalan rantai penghantar yang digunakan di lombong Clausthal. Dalam tahun 1839, Jean Victor Poncelet pertama kali menggunakan perkataan “lesu” secara rasmi dalam buku mekanik. August Wöhler (1867), penyelidik dari negara Jerman telah menjalankan banyak ujian lesu di makmal dengan menggunakan tegasan ulang-alik. Ujikaji-ujikaji ini berkaitan dengan kegagalan gandar landasan keretapi dan ia telah diperakukan sebagai kajian secara sistematik yang pertama berkenaan dengan lesu. Oleh itu, Wöhler telah dikenali sebagai “bapa” kepada ujikaji lesu yang sistematik. Beliau merupakan orang yang pertama yang menjalankan ujian secara intensif ke atas spesimen berbanding dengan komponen yang sebenar. Wöhler juga telah memperkenalkan konsep gambar rajah hayat-tegasan ($S-N$) dan had lesu (Schutz 1996 ; Bhat & Patibandla 2011).

Pada awal tahun 1900-an, Ewing & Humfrey (1903) telah menggunakan mikroskop dalam kajian mengenai mekanisma kegagalan lesu. Melalui pemerhatian mikroskop, kajian tentang faktor terbentuknya keretakan mikro telah dijalankan dan garisan gelinciran setempat serta jalur gelinciran yang bertindak sebagai faktornya telah ditemui. Basquin (1910), dalam kajiannya telah menunjukkan perkaitan lurus bagi tegasan ulang-alik yang dikenakan kitaran lesu apabila ia diplotkan pada skala log-log, yang mana pekali kekuatan lesu dan eksponen Basquin dapat diperolehi daripada graf yang diplotkan. Pengenalan kepada sistem ujian servo-hidraulik kitaran tertutup dalam tahun 1950-an telah membawa sumbangan yang besar ke atas ujikaji lesu yang mana simulasi pembebanan yang dikenakan ke atas spesimen dapat ditunjukkan dan direkodkan dengan lebih baik. Manson (1954) dan Coffin (1954) pula telah mengkaji kelesuan di bawah kawalan terikan serta mendapatkan perkaitan

antara amplitud terikan dan hayat lesu. Manakala, Paris & Erdogan (1963) telah memperkenalkan kaedah bersistematik untuk mengenalpasti perambatan retak lesu menggunakan kaedah mekanik patah.

Kajian terhadap kegagalan lesu terus dijalankan hingga ke hari ini dengan memberi penekanan kepada pelbagai faktor yang mempengaruhi hayat lesu sesuatu struktur dan komponen kejuruteraan seperti mikrostruktur dan saiz berbutir bahan (Xu et al. 2012; Wang et al. 2012), kemasan permukaan (McKelvey & Fatemi 2012), bentuk geometri (Lillemae et al. 2012), keadaan pembebanan (Lu & Liu 2011; Costa et al. 2012), keadaan persekitaran (Dormana & Lee 2011) dan kesan suhu (Tomioka et al. 2011; Oskouei & Ibrahim 2012).

Pembebanan amplitud-malar telah digunakan dalam sebahagian besar pengkajian hayat lesu (Stephen et al. 2001; Post et al. 2008). Kelebihan utama pembebanan amplitud-malar ialah dapat disesuaikan dengan keupayaan kebanyakan mesin pengujian lesu dan juga dapat memudahkan analisis yang dijalankan (Wei et al. 2002; Beden et al. 2009). Manakala dalam pembebanan pelbagai amplitud, kitaran tegasan dan terikan lesu yang dikenakan berubah amplitud dengan masa (Murthy 2003; Varvani et al. 2005). Kajian lesu dengan menggunakan pembebanan pelbagai amplitud adalah lebih kompleks kerana ia melibatkan kesan pembebanan lampau (Liu & Mahandevan 2007; Carvalho et al. 2010).

Pembebanan spektrum mempunyai nilai amplitud tegasan maksimum dan minimum yang berubah dengan masa dan mempunyai corak pembebanan berulang yang tertentu. Kajian lesu di bawah pembebanan spektrum dilakukan bagi mengkaji kesan turutan pembebanan ke atas hayat lesu. Beban-lebih secara tegangan dalam turutan pembebanan merencatkan kadar perambatan retak lesu (Ray & Patanker 2001; Schjive et al. 2004; Borego et al. 2005). Manakala, beban-kurang secara mampatan pula boleh mempercepatkan kadar perambatan retak lesu (Zitounis et al. 2007; Lee et al. 2009; Mikheevskiy et al. 2009). Analisis lesu di bawah pembebanan spektrum adalah lebih kompleks kerana ia melibatkan interaksi beban dalam turutan pembebanan, yang mana ia bergantung kepada kombinasi beban-lebih atau beban-kurang (Daneshpour et al. 2009), penyusunan blok pembebanan (Jono 2005; Borego